

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

№ 4

ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК

1989

2. Для каждого фиксированного значения переменной J , изменяющейся в пределах от $-J_m$ до $+J_m$ вычисляем величины J^* и J' по формулам:

$$J^* = J_m [1 - \alpha^* \Psi(X)]; \quad J' = J_m X [1 - \alpha' \Psi(X)];$$

$$X = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{J}{J_m} \right); \quad \Psi(X) = (1 - X^2) \operatorname{th} [\lambda X \exp(\gamma \lambda X^2)].$$

3. По формуле

$$H = -\varphi(J^*) + 2\varphi(J')$$

определяем соответствующие значения H , то есть точки восходящей ветви петли. Функция $H' = \varphi(J')$ описывает основную кривую намагничивания.

Методика определения вышеуказанных констант по экспериментальным данным может быть различной. Примененная в настоящей работе методика опиралась на несколько заданных петель семейства и сводилась к следующему.

1. Для каждой заданной петли нужно найти значения четырех параметров α^* , α' , γ и λ :

— вначале, учитывая, что для верхних полуветвей $\Psi(X) = (1 - X^2)$, то есть параметры γ и λ не играют роли, находим значения α^* и α' , соответствующие минимуму среднеквадратического отклонения δ_v и экспериментальных точек верхней полуветви от расчетной кривой;

— пользуясь полученными значениями α^* и α' , находим значения параметров λ и γ , соответствующие минимуму среднеквадратического отклонения δ_n экспериментальных точек нижней полуветви от расчетной кривой. Параметр γ , одинаковый для всех петель, достаточно определить из одной (предельной) петли и тогда для остальных петель останется находить (путем минимизации δ_n) только один параметр λ ;

— как для α^* и α' , так и для λ полезно определять также интервалы их вариаций, которые соответствуют лишь незначительному росту погрешностей δ_v и δ_n , причем при малых амплитудах намагниченности эти интервалы могут быть довольно большими.

2. Нанеся на график полученные значения α^* , α' и λ в зависимости от J_m , определяем соответствующие пары коэффициентов (k^*, β^*) , (k', β') и (λ_0, K) аппроксимирующих функций (11), (12) и (15).

Институт физики металлов
УрО АН СССР

Поступила в редакцию
31 декабря 1987 г.;
в окончательном варианте —
7 сентября 1988 г.

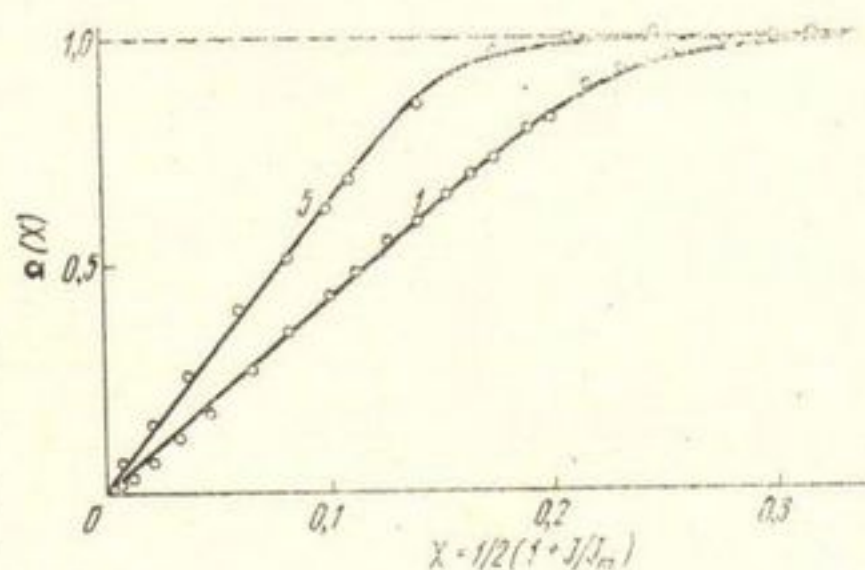


Рис. 4. Функция $\Omega(X)$ для 1- и 5-й петель семейства:

○ — точки, рассчитанные по экспериментальным данным; — аппроксимация по формуле (14).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельгуй М. А. Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков. — Дефектоскопия, 1987, № 11, с. 3—10.
2. Мельгуй М. А., Шидловская Э. А. Экспериментальная проверка аналитических выражений для нелинейных свойств ферромагнитных материалов. — Дефектоскопия, 1987, № 11, с. 10—18.
3. Городецкий П. Г. Обзор аналитических выражений кривых намагничивания и гистерезисных петель. — Киев: Воениздат, 1956. — 156 с.

4. Fischer J., Moser H. Die Nachbildung von Magnetisierungskurven durch einfache algebraische oder transzendente Funktionen. — Arch. Elektrotechn., 1956, 42, N 5, S. 286—299.
5. Зарипов М. Ф., Фикс-Марголина И. Г., Вахитова Х. З. Анализ различных методов аппроксимации кривой намагничивания. — ДАН УзССР, 1974, № 3, с. 8—10.
6. Benkó S. Mágneszési görbék numerikus ábrázolása. — Elektrotechnika, 1977, 70, N 7, p. 247—255 (венг.).
7. Schwarz J. Détermination des pertes par hysteresis dans un échantillon de métal. — Rev. Gén. Electr., 1927, 22, N 16, p. 617.
8. Бессонов Л. А. Расчет электрических цепей с учетом гистерезиса. — Электричество, 1948, № 1, с. 45—51.
9. Бладыко В. М., Мазуренко А. А., Дементьев О. А. Определение коэффициентов аппроксимации динамических петель гистерезиса по гармоническому спектру кривой тока. — Изв. вузов. Энергетика, 1972, № 3, с. 112—115.
10. Пономарев Ю. Ф. Гармонический анализ намагниченности ферромагнетиков, перемагничиваемых переменным полем, с учетом магнитного гистерезиса. I. Способ описания петель магнитного гистерезиса. — Дефектоскопия, 1985, № 6, с. 61—67.
11. Trutt F., Erdelyi E., Hopkins R. Representation of the magnetisation characteristic of dc machines for computer use. — IEEE Trans. Power. App. Syst., 1968, 87, N 3, p. 665—669.
12. Маляр В. С., Фильц Р. В. Аппроксимация характеристик намагничивания сплайнами. — Изв. вузов. Энергетика, 1977, № 11, с. 119—121.
13. Мишин В. И., Собор И. В. Аппроксимация кривых намагничивания кубическими сплайнами. — Изв. вузов. Энергетика, 1978, № 7, с. 123—126.
14. Beckert U., Rieck H. Darstellung von Magnetisierungskurven durch kubische Spline-Funktionen. — Zs. elektr. Inform. Energietechnik, 1980, 10, N 1, S. 69—73.
15. Кондорский Е. И. Теория гистерезиса поликристаллических ферромагнетиков в слабых магнитных полях. — ДАН СССР, 1941, 30, № 7, с. 598—602.
16. Кадочников А. И., Миронюк Н. Е. Область применимости формул Рэлея и преобразований Кондорского для описания петель гистерезиса электротехнических сталей. — Электротехника, 1982, № 9, с. 14—16.
17. Набиев М. А., Адыгезалов Ф. С., Азизов Б. М. Аналитический метод определения коэрцитивной силы ферромагнитных материалов. — Электричество, 1978, № 5, с. 78.
18. Саркисов С. Д., Шмидт Р. К. Построение предельной петли гистерезиса по параметрам B_s , B_r , H_c магнетика. — Изв. АН ЛатвССР, сер. физ. и техн. наук, 1982, № 4, с. 94—99.
19. Gillet D., Abrams M. Determination of minor hysteresis loops of isotropic ferromagnetic materials. — IEEE Trans. Magn., 1965, 1, N 3, p. 235—236.
20. Biorci G., Pescetti D. Analytical theory of the behaviour of ferromagnetic materials. — Il nuovo cimento, 1958, 7, N 6, p. 829—842.
21. Беспалов В. Я., Маринин Ю. С., Мощинский Ю. А. Математические модели петли гистерезиса в переходных режимах. — Изв. вузов. Электромеханика, 1982, № 1, с. 8—15.
22. Золотарев Н. А. Математическая модель намагничивания ферромагнетиков в однонаправленном поле. — Изв. вузов. Электромеханика, 1976, № 12, с. 1298—1304; 1978, № 7, с. 691—697.
23. Глухов В. П., Дроздов В. А., Пугачев В. А., Шмидт Р. К., Яблуновский В. Д. Нормализация характеристик намагничивания. Рига: Зинатне, 1974, 195 с.

УДК 620.179.14

ИМПУЛЬСНЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ ТОЛЩИНОМЕР ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

В. А. Сясько, С. В. Илюшин

Описаны схема, тестовой алгоритм обработки первичной информации и конструкция импульсного вихретокового толщиномера диэлектрических покрытий. Приведены основные технические характеристики.

Для большинства выпускаемых вихретоковых толщиномеров диэлектрических покрытий на электропроводящем неферромагнитном основании характерно влияние мешающих факторов (температура окружающей среды Θ , электропроводность σ и толщина T_0 основания, сетевые наводки, краевой эффект и др.) и нестабильности параметров пре-

образователей на погрешность измерения Δ . Перед началом работы толщиномеры требуют прогрева, проведения калибровки при изменении T_0 и σ , а также в процессе работы.

В [1] показано, что если ток в возбуждающей обмотке есть единичная ступенчатая функция ($i(t < 0) = 0$, $i(t \geq 0) = I_0$), то величина вносимой вихревыми токами эдс на измерительной обмотке в момент времени $t = 0_+$ зависит только от толщины покрытия T . Однако на практике трудно обеспечить этот режим работы.

Рассмотрим режим питания возбуждающей обмотки от источника постоянного напряжения через периодически коммутируемый электронный ключ. В момент замыкания ключа ток i в возбуждающей обмотке начнет возрастать от нуля до стационарного значения I_0 [2]

$$i(t, T) = I_0 \left\{ 1 - \exp \left[-t / \left(\tau_k + \frac{L_{10} + L_{1B}(t, T)}{R_0} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где τ_k — постоянная времени электронного ключа; L_{10} , $L_{1B}(t, T)$ — собственная индуктивность уединенной возбуждающей обмотки и вноси-

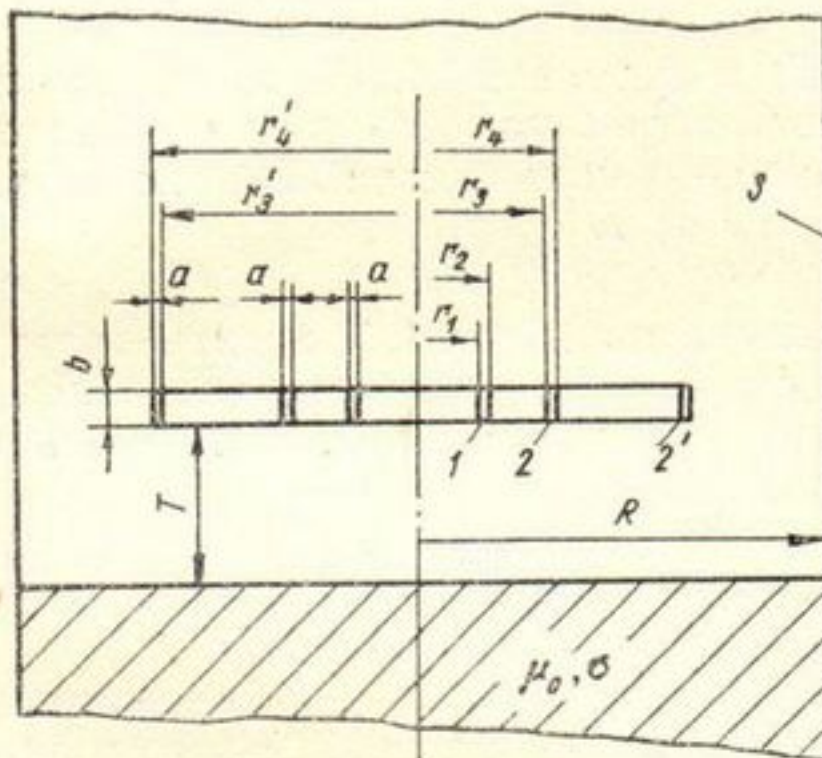


Рис. 1. Расчетная модель трансформаторного преобразователя в цилиндрическом экране:

1 — возбуждающая обмотка; 2 и 2' — измерительные обмотки; 3 — сверхпроводящий экран.

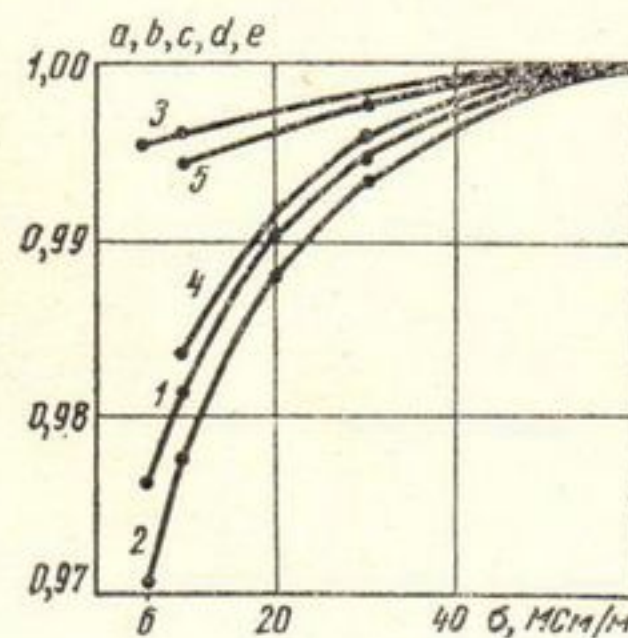


Рис. 2. Зависимость вносимой взаимной индуктивности и погрешности преобразования толщиномера от электропроводности основания:

$$\begin{aligned} 1 - a &= M_B(\sigma) / M_B(\sigma = 58); \\ 2 - b &= M'_B(\sigma) / M'_B(\sigma = 58); \\ 3 - c &= n(\sigma) / n(\sigma = 58); \\ 4 - d &= T_1(\sigma) / T_1(\sigma = 58); \\ 5 - e &= T_x(\sigma) / T_x(\sigma = 58). \end{aligned}$$

мая индуктивность соответственно; R_0 — активное сопротивление обмотки возбуждения.

Электродвижущая сила, наводимая при этом на измерительной обмотке [2],

$$e_2(t, T) = - (M_0 + M_B(t, T)) \frac{di(t, T)}{dt}, \quad (2)$$

где M_0 , $M_B(t, T)$ — взаимная основная и вносимая соответственно индуктивности возбуждающей и измерительной обмоток. В [2] в операторной форме дано выражение вносимой взаимной индуктивности $M_B(\rho, T)$ для накладного экранированного кольцевого трансформаторного преобразователя прямоугольного поперечного сечения над проводящей пластиной. Для трансформаторного преобразователя в сверхпроводящем цилиндрическом экране бесконечной длины над проводящей ферромагнитной основой (рис. 1) предельный переход от изображения $M_B(\rho, T)$ к оригиналу $M_B(t, T)$ дает:

$$M_B(t, T) = -\frac{2\pi\mu_0 W_1 W_2}{a^2 b^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{f(t) I_1 I_2}{n_i \lambda_i^2 J_0^2(\lambda_i)} \exp\left[-2n_i\left(T + \frac{b}{2}\right)\right] [1 - \exp(-n_i b)]^2; \quad (3)$$

$$I_1 = \int_{r_1}^{r_2} J_1(n_i r) r dr, \quad I_2 = \int_{r_3}^{r_4} J_1(n_i r) r dr \quad [2];$$

J_0 и J_1 — функции Бесселя нулевого и первого порядков; λ_i — корни уравнения $J_1(\lambda) = 0$; $n_i = \lambda_i/R$; W_1 и W_2 — число витков возбуждающей и измерительной обмоток;

$$f(t) = (1 + 2k_2^2 t) \operatorname{erfc}(k_2 \sqrt{t}) - 2k_2 \sqrt{t/\pi} \exp(-k_2^2 t);$$

$k_2^2 = n_i^2/\sigma\mu_0$; $\operatorname{erfc}(x)$ — дополнительная функция ошибок.

Из (1) — (3) следует, что для получения информации о T достаточно кратковременно подключить возбуждающую обмотку к источнику постоянного напряжения и зафиксировать амплитуду $e_2(t_0, T)$, где t_0 — момент достижения максимума.

Линейное преобразование $e_2(t_0, T)$ в цифровой код N_2 может выполняться аналого-цифровым преобразователем на базе пикового детектора и генератора линейно нарастающего напряжения. В этом случае

$$N_2 = a_0(t) + a_1(t) e_2(t_0, T, T_0, \sigma, I_0, \dots), \quad (4)$$

где a_0 и a_1 — аддитивный и мультипликативный коэффициенты градуировочной характеристики преобразования. При данном одноцикловом алгоритме преобразования показания толщиномера будут зависеть от мешающих факторов и коэффициентов a_0 и a_1 .

Наличие в составе толщиномера микроконтроллера позволяет реализовать структурные методы уменьшения коррелированной с мешающими факторами составляющей Δ погрешности измерения Δ .

Введем в состав преобразователя две отличающиеся по геометрическим характеристикам измерительные обмотки (см. рис. 1) и выполним последовательно четыре цикла преобразования:

$$e_2(t_0, T_1) \rightarrow N_2; \quad (5a)$$

$$e_2'(t_0, T_1) \rightarrow N_2'; \quad (5б)$$

$$e_2(t_0, T_2) = e_{20}(t_0) \rightarrow N_{20}; \quad (5в)$$

$$e_2'(t_0, T_2) = e_{20}'(t_0) \rightarrow N_{20}'; \quad (5г)$$

где e_2 и e_2' — эдс на измерительных обмотках на покрытии ($T = T_1$) и вдали от покрытия ($T_2 \gg T_{\max}$ — максимального значения T), после чего с помощью микроконтроллера вычислим отношение

$$n(T_1) = (N_{20} - N_2)/(N_{20}' - N_2'). \quad (6)$$

С целью уменьшения влияния $L_{1B}(t, T)$ на точность преобразования (6) используется возбуждающая обмотка и транзисторный ключ с $\tau_K \gg L_{10}/R_0$. В этом случае скорость нарастания тока будет определяться величиной τ_K .

Таким образом, на основании (2) с учетом (4) — (6) и принятых допущений получим

$$n(T_1) \approx M_B(T_1)/M_B'(T_1). \quad (7)$$

Анализ влияния σ основания на $M_B(t, T)$, $M_B'(t, T)$ и $n(T)$, а также экспериментальное исследование характеристик толщиномера были

выполнены для неэкранированного трансформаторного преобразователя, параметры которого приведены в таблице. Для данного трансфор-

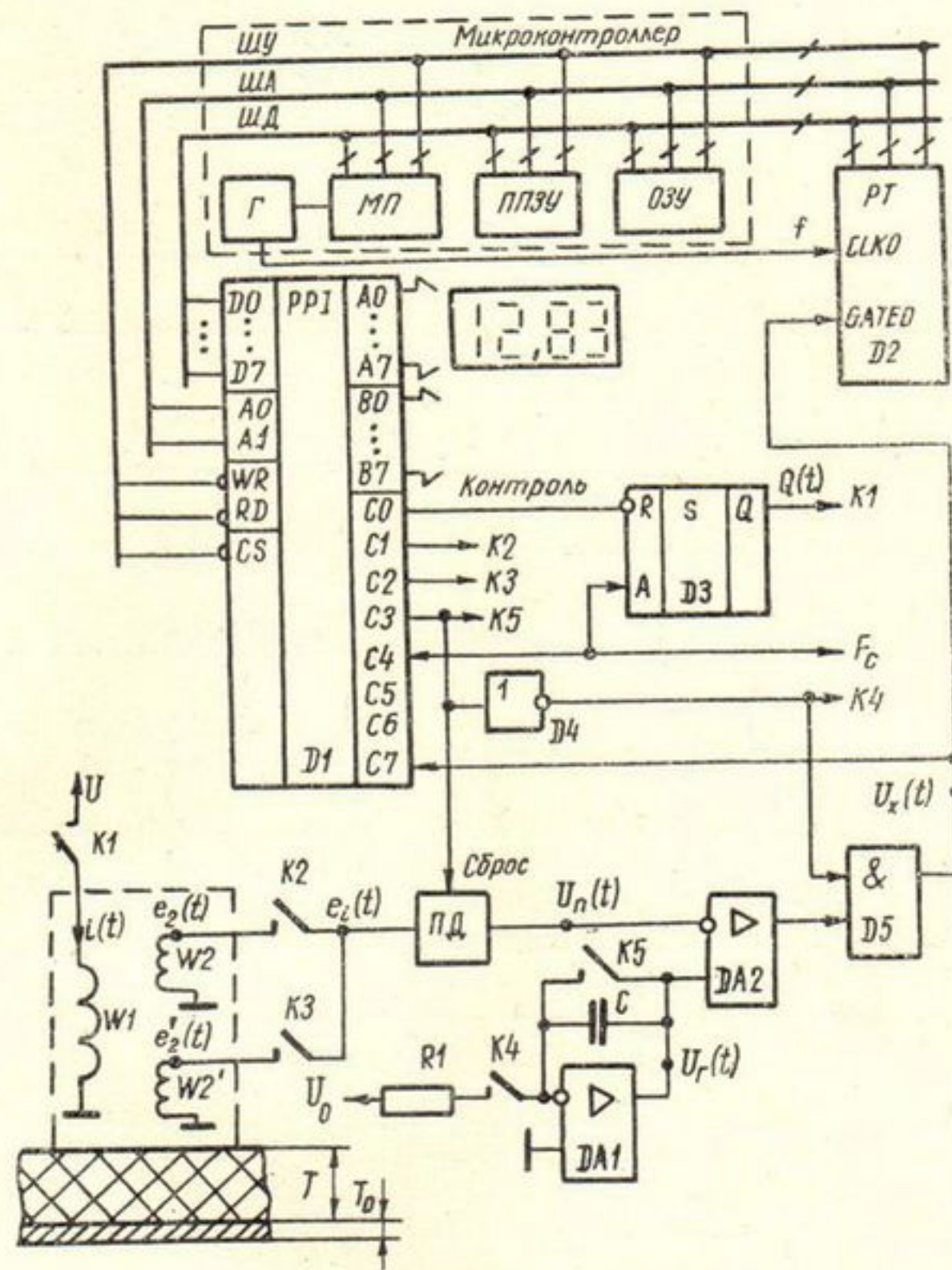


Рис. 3. Функциональная схема вихретокового толщиномера:

Г — генератор (КР580РФ24); МП — микропроцессор (КР580ИК80); запоминающие устройства — ОЗУ — оперативное (2×КР537РУ13), ППЗУ — перепрограммируемое постоянное (2×К573РФ5); D1 — интерфейс (КР580ВВ55); D2 — таймер (КР580ИК53); D3 — одновибратор (К155АГ3); D4 — К155ЛН1; D5 — К155ЛН1; ПД — пиковый детектор; ОА1, ОА2 — операционные усилители (КР140УД8); обмотки — W1 — возбуждающая, W2, W2' — измерительные; ключи — K1 — силовой (КТ818), K2—K5 — аналоговые (КР590КН2); шины — ША — адреса, ШД — данных; ШУ — управления.

маторного преобразователя экспериментально определено $t_0 \approx 0,5$ мкс. При $R \gg r_4$ можно использовать (3) для анализа точности работы

Параметры обмоток трансформаторного преобразователя толщиномера

Параметр	Обмотки		
	Возбуждающая	Измерительные	
		W ₁	W ₂
Диаметр, мм			
внешний	14	30	60
внутренний	12	28	58
Длина, мм	3	3	3
Количество витков	50	50	50
Тип провода	ПЭВ-2-0,1	ПЭВ-2-0,1	ПЭВ-2-0,1

толщиномера с неэкранированным трансформаторным преобразователем [2].

На рис. 2 приведены расчетные графики (для $R=150$ мм, $t_0=0,5$ мкс), иллюстрирующие влияние σ на $M_B(T)$, $M'_B(T)$ и $n(T)$. Нормирование характеристик осуществлено по соответствующему вносимому коэффициенту взаимной индукции или $n(T)$ для $\sigma=58$ МСм/м. Ана-

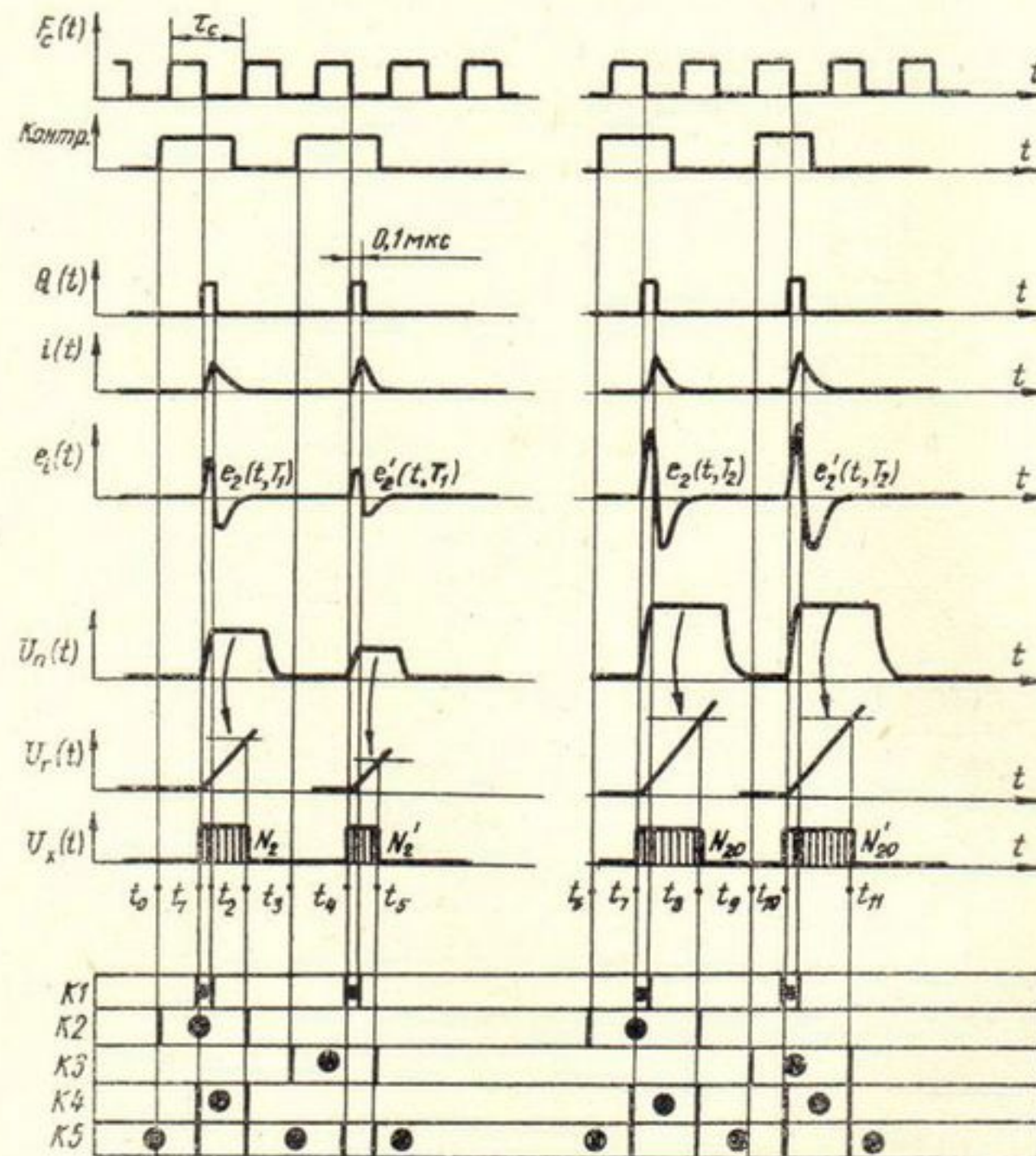


Рис. 4. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу толщиномера, и таблица состояния ключей:

● — замкнутое состояние ключа.

лиз показывает, что σ влияет на $n(T)$ в 4—5 раз слабее, чем на $M_B(T)$.

Благодаря выполнению в (6) операций вычитания и последующего деления исключается зависимость $n(T)$ от a_0 и a_1 .

Функциональная схема толщиномера и временные диаграммы работы представлены на рис. 3 и 4.

С целью исключения влияния сетевой наводки на точность определения T работа аналоговой части толщиномера синхронизируется с помощью одновибратора $D3$, запускаемого импульсами F_c с формирователя, период следования которых равен периоду сетевого напряжения. В этом случае сетевая наводка устраняется при вычислении (6).

В момент t_0 начала преобразования на вход $R D3$ подается команда *Контроль* и замыкается ключ $K2$. В момент t_1 по отрицательному фронту $F_c D3$ формирует импульс $Q(t)$ длительностью 0,1—0,2 мкс, подаваемый на электронный ключ $K1$, на измерительных обмотках наводятся эдс $e_2(t, T)$ и $e'_2(t, T)$. Пиковый детектор выделяет амплитудное значение $e_2(t, T)$. Одновременно формируется линейно нарастающее напряжение $U_r(t)$. В момент t_2 , когда $U_n(t_2) = U_r(t_2)$, срабатывает компаратор $DA2$, что приводит к установке схемы в исходное состояние.

Выходной интервал времени t_2-t_1 заполняется импульсами с частотой следования $f_0=2$ МГц. Количество импульсов $N_2=f_0(t_2-t_1)$ подсчитывается 16-разрядным счетчиком таймера D2 и вводится в ОЗУ микроконтроллера. Аналогично во втором такте работы определяется $N'_2=f_0(t_5-t_4)$. Обновление N_{20} и N'_{20} осуществляется с интервалом 3—5 мин. Микроконтроллер выдает звуковой сигнал, по которому оператор должен отнести преобразователь от изделия, после чего определяются значения N_{20} и N'_{20} .

Итак, в точке контроля по N_2 и N'_2 , а также определенным в цикле обновления N_{20} и N'_{20} вычисляется $n(T)$ по (6).

Аппроксимация сквозной градуировочной характеристики производится степенной функцией $T_x=an^2+bn+c$, что обеспечило при градуировке толщиномера по стандартным образцам толщины через 3 мм максимальную погрешность аппроксимации не более 0,03 мм.

Для исследования влияния температуры Θ толщиномер после нагрева в термостате на $\Delta\Theta=20^\circ$ вынимали и при различном времени: между обновлением N_{20} и N'_{20} снимали показания толщиномера на интервалах до 20 мин. Оказалось, что постоянная времени теплового переходного процесса $\tau_\Theta \geq 2,5$ мин. Этот эксперимент позволил выбрать время между обновлением N_{20} и N'_{20} порядка 3 мин при времени самопрогрева после включения не более 3—4 мин. Долговременные испытания температурной стабильности показали, что при плавных изменениях $\Theta(t)$ от 5 до 40° девиация показаний $\Delta T_x \leq 0,03$ мм для $T=20$ мм. При одноцикловом режиме работы изменение показаний $\Delta T_1=0,8$ мм для $T=20$ мм.

Исследование влияния электропроводности σ проводили на образцах с $T_0=10$ мм. В экспериментах электропроводность изменяли от 58 до 10 МСм/м. За базовые принимали показания при $\sigma=58$ МСм/м. Из характеристик 4 и 5 рис. 2 следует, что при одноцикловом режиме работы указанное изменение σ приводило к относительной погрешности $\delta T_1=1,8\%$, в то время как использование преобразования (6) позволило снизить погрешность измерения до $\delta T_x=0,6\%$ при прочих равных условиях. Подавление влияния σ на точность измерения соответствует полученным при расчетах по (3) значениям.

Исследование влияния T_0 проводили на подложках из алюминия. Изменение T_0 от 10 до 0,02 мм вызвала $\delta T_x < 0,5\%$, в то время как при одноцикловом режиме работы $\delta T_1 \approx 4\%$.

Выполнение преобразования (6) позволило исключить органы регулировки и операции ручной калибровки. Введение микроконтроллера позволяет встраивать толщиномер в автоматизированные системы контроля.

Техническая характеристика толщиномера

Диапазон измеряемых толщин, мм	0,1—20
Основная погрешность измерения, мм	0,1
Время измерения в точке контроля, с	0,2
Время самопрогрева, мин	4
Время между циклами обновления, мин	3
Радиус изделия в зоне контроля, мм	≥ 1000
Толщина основания, мм	$\geq 0,05$
Электропроводность основания, МСм/м	≥ 8
Масса, кг	1,2
Потребляемая мощность, ВА	10

Поступила в редакцию
30 марта 1988 г.;
в окончательном варианте —
21 октября 1988 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Кн. 2. Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1986. — 356 с.
 2. Яцун М. А. Собственная и взаимная индуктивность накладного экранированного кольцевого преобразователя над проводящей пластиной. — Тезисы докл. IX Всесоюзной научно-технической конференции по неразрушающим методам контроля. Ч. 2. — Минск, 1981, с. 260—262.
-